近60 a天山北坡经济带天然径流量时空变化及归因识别

李宇航[1]， 余文学[1]， 杨永均[2]， 朱燕峰[2]， 马 静[1]， 陈 浮[1]

（1. 河海大学公共管理学院，江苏 南京 211000；2. 中国矿业大学环境与测绘学院，江苏 徐州 221116）

摘 要：天山北坡经济带地处干旱的亚洲腹地，厘清天然径流量（NR）时空变化及成因对统筹区域发展、维持生态安全至关重要。为此，采用Sen's斜率估计法、Mann-Kendall趋势检验等分析径流量时空变化，基于Budyko假设的水热耦合平衡方程定量评价降水、潜在蒸散发及下垫面对NR变化的贡献。结果表明：（1）近60 a天山北坡经济带NR总体呈显著增加趋势，年变化率0.68 $mm\cdot a^{-1}$。1961—1986年波动较大，1987—2012年波动变小且NR增加明显，2013年后NR显著减少。（2）NR大小与海拔变化在空间上高度叠合，天山北坡经济带西部和南部NR较大，西南部与西北部增长幅度大。（3）NR突变点为1980年与2013年，降水一直是NR变化的主导因素，但下垫面影响不断加大，近60 a贡献率从31.5%增至45.5%。（4）2012年前天然径流量主要受降水主导，但不同区域影响不同。2013年，西部、东部与中南部下垫面对径流量的影响已超过降水成为主导因素。研究成果深化了天山北坡经济带NR变化的认识，为天山北坡经济带高质量发展提供科学支撑。

关键词：天然径流量变化；时空格局；降水；下垫面；天山北坡经济带

河川径流是水循环的重要组成部分[1]，也是影响生态环境变化和社会经济发展的重要因素[2]。受气候变化和人类活动的影响，水资源的空间分布以及水文循环过程均会发生明显改变，河川径流的水文特性更加复杂[3-5]。干旱区的河川径流水文变化将对地区用水产生显著影响，在全球气候变暖以及人类活动加剧背景下，水资源问题将会更加突出[6]。天山北坡经济带地处干旱的亚洲腹地，是"一带一路"向中亚辐射的启动区，也是新疆经济社会发展的核心区[7]，更是我国西北生态屏障。然而，干旱的自然环境和日益增长的水需求导致区域水资源压力空前[8]。因此，研究天山北坡经济带径流特征与归因对地区生态保护与社会发展有重要意义。

当前，已有学者对天山北坡经济带径流量的变化特点及影响因素开展研究。陈伏龙等[9]研究得出新疆玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站径流量变化受气候变化主导，其中降水量增加对径流量增加的贡献率达59.64%，蒸发量贡献率为31.83%。魏天锋等[10]检验得出呼图壁河年径流量突变点为1987年，气温相较于降水对径流量变化的贡献率更大，表明高山冰雪融水是呼图壁河的主要补给方式。军塘湖河则是降水补给型河流，径流量年内分配不均衡，降水对径流量的贡献率为74.32%，人为因素对径流量的影响贡献率最大只有25.68%[11]。上述研究结果与其他干旱区河流研究相似[12-15]，整体径流量变化仍受制于气候，包含降水、气温变化引起的冰川融化等因素。由于径流量变化的影响因素复杂，在径流量归因分析时需要对各因素进行分离。当前基于Budyko假设的水热耦合平衡方程是用于分离径流量变化影响因素的主要方法之一，其考虑了潜在蒸发的影响，包含径流量对降水和蒸发的敏感性分析，与真实水循环过程更接近[16]，已被学界广泛应用。张丽梅等[17]采用基于Budyko假设的水热耦合平衡方程将影响渭河变化的因素分离为降

收稿日期：2024-05-15； **修订日期**：2024-07-23
基金项目：第三次新疆综合科学考察重大专项课题（2022xjkk1005）；国家自然科学基金面上项目（52374170）
作者简介：李宇航（2000-），男，硕士研究生，主要从事水土资源空间匹配研究. E-mail: yigeli@hhu.edu.cn
通讯作者：陈浮. E-mail: chenfu@hhu.edu.cn

水、潜在蒸散发以及下垫面，分别量化各类因素对径流量变化的贡献率。胡广录等[4]利用基于Budyko假设的水热耦合平衡方程，对正义峡径流量变化趋势进行了归因分析。

综上，学界已经对天山北坡部分河流的水文特征与影响因素进行了分析，研究集中在单一径流流域范围内，对天山北坡经济带径流整体变化缺乏研究，也极少关注不同因子贡献率的空间差异。此外，径流分为实测径流与天然径流[18]，一些研究的径流数据多为实测数据，对天然径流变化缺少研究。天然径流排除了人为干扰和调节，对厘清自然过程形成的径流、变化过程及其利用与优化具有重要意义[19-20]。因此，本研究基于1961—2018年水文气象数据，采用Mann-Kendall非参数统计检验和基于Budyko假设的水热耦合平衡方程等方法定量检测了天山北坡经济带NR时空变化及影响因素的分异特征，为天山北坡经济带水资源协调管理和经济社会高质量发展提供科学支撑。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

天山北坡经济带地处天山北麓与准噶尔盆地南部，地势南高北低（图1），属典型温带大陆性气候，年均降水量不足200 mm，季节差异显著[21]。其包含博尔塔拉蒙古自治州、昌吉回族自治州、克拉玛依市、石河子市、塔城地区、乌鲁木齐市和伊犁哈萨克自治州，是新疆城市化水平最高、人口最密集、产业最集中的地区[22]。近年来受气候变化和人类活动的影响，水资源短缺、土地退化、资源过度开发与不合理利用等问题严重威胁区域社会安定和经济高质量发展。

1.2　数据来源与处理

本研究所用数据为国家青藏高原数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）公开数据，包含天然径流量、气温、降水和潜在蒸散发量，分别来源于中国天然径流量（NR）格点数据集CNRD v1.0（分辨率为0.25°，采用径流深表示大小）、中国1 km分辨率逐月平均气温数据集、中国1 km分辨率逐月降水量数据集和中国1 km逐月潜在蒸散发数据集。

1.3　研究方法

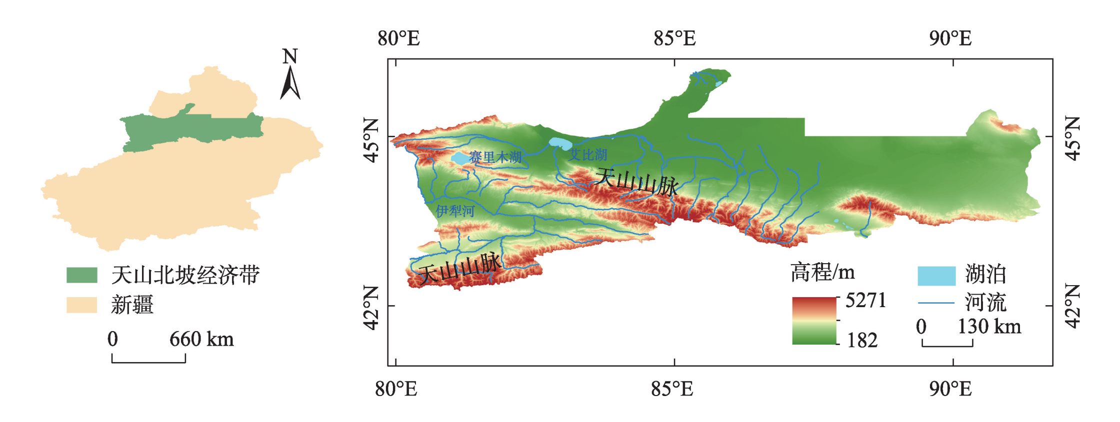
采用Sen's斜率估计法对天山北坡经济带NR变化进行分析，斜率代表NR变化大小。但Sen's斜率估计法不包含序列趋势显著性判断，必须利用Mann-Kendall非参数统计检验方法对序列趋势开展显著性检验[23]。再运用降水-径流双累积曲线检验确定NR突变点，结合Mann-Kendall非参数统计检验进行验证。最后运用基于Budyko假设的水热耦合平衡方程识别NR变化的归因，具体采用Fu等[24]提出的Budyko解析表达式。

1.3.1　流域水量平衡方程　基于Fu等[24]提出的Budyko解析表达式，Yang等[25]和Choudhury等[26]进一步得到表达流域水热耦合平衡的Budyko曲线方程，流域水量平衡方程可以具体表达为：

$$R = P - \left[P \times ET_0 \Big/ \left(P^{\omega} + ET_0^{\omega} \right)^{1/\omega} \right] \tag{1}$$

式中：R为天然径流量NR(mm)；P为降水量(mm)，ET_0为年平均潜在蒸散发量(mm)；ω表示下垫面。

1.3.2　敏感性分析　水量平衡方程可表示为$R=f\left(P,ET_0,\omega\right)$，NR对特定独立变量$x$的弹性系数[27-28]



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2023)2767号，对底图边界无修改。下同。

图1　研究区位置与地形水系图

Fig. 1　Location, topography and river system of the study area

采用下列公式表示：

$$\varepsilon_{x_i} = (\partial R/\partial x_i) \times (x_i/R) \tag{2}$$

式中：ε_{x_i} 是NR对特定独立变量 x_i 的弹性系数；x_i 表示 P 、ET_0 或 ω 。假设：

$$\phi = ET_0/P \tag{3}$$

各变量弹性系数计算如下：

$$\varepsilon_P = \left[\left(1+\phi^{\omega}\right)^{(1/\omega+1)} - \phi^{\omega+1}\right] / \left\{\left(1+\phi^{\omega}\right)\left[\left(1+\phi^{\omega}\right)^{1/\omega} - \phi\right]\right\} \tag{4}$$

$$\varepsilon_{ET_0} = 1 / \left(1+\phi^{\omega}\right)\left[1-\left(1+\phi^{-\omega}\right)^{1/\omega}\right] \tag{5}$$

$$\varepsilon_{\omega} = \left[\ln\left(1+\phi^{\omega}\right) + \phi^{\omega}\ln\left(1+\phi^{-\omega}\right)\right] / \left\{\omega\left(1+\phi^{\omega}\right)\left[1-\left(1+\phi^{-\omega}\right)^{1/\omega}\right]\right\} \tag{6}$$

式中：若某个变量弹性系数>0，则表示该变量对NR为正向影响，NR随该变量增加而增加。反之则表示负向影响，NR随着该变量的增加而减小。ε_P 表示降水量 P 的弹性系数；ε_{ET_0} 表示潜在蒸散发量 ET_0 的弹性系数；ε_{ω} 表示下垫面 ω 的弹性系数。

1.3.3　天然径流量变化贡献度分析　根据突变点可将时间区段划分为基准期（平均NR为 R_1 ）与变化期（平均NR为 R_2 ），基准期与变化期之间年均NR变化为两时段的年均NR之差 dR (mm)，可表示为：

$$dR = R_2 - R_1 \tag{7}$$

同理，其他因素的变化可以表示为：

$$dx_i = x_{i1} - x_{i2} \tag{8}$$

式中：dx_i 为降水量 P (mm)、潜在蒸散发量 ET_0 (mm)或下垫面 ω 变化期与基准期之差；x_i 表示降水量(mm)、潜在蒸散发量(mm)或下垫面；x_{i1} 与 x_{i2} 分别表示变化期与基准期降水量(mm)、潜在蒸散发量(mm)以及下垫面。

NR变化量是降水量、潜在蒸散发量及下垫面变化引起的NR变化之和，具体公式为：

$$dR' = dR_P + dR_{ET_0} + dR_{\omega} \tag{9}$$

式中：dR' 为NR变化量(mm)；dR_P、dR_{ET_0}、dR_{ω} 分别为降水 P 变化和潜在蒸散发 ET_0 变化与下垫面 ω 变化引起的NR变化量(mm)。

不同因素变化引起的NR变化如下：

$$dR_{x_i} = \varepsilon_{x_i}\left(R/x_i\right)dx_i \tag{10}$$

式中：dR_{x_i} 为降水量 P 、潜在蒸散发量 ET_0 或下垫面 ω 引起的NR变化量(mm)。

各因素对NR变化的相对贡献计算如下：

$$C_{x_i} = \left|dR_{x_i}\right| / \left(\left|dR_P\right| + \left|dR_{ET_0}\right| + \left|dR_{\omega}\right|\right) \times 100\% \tag{11}$$

式中：C_{x_i} 表示各因子对NR变化的贡献率。

2　结果与分析

2.1　天然径流量时空变化特征

图2a表明，1961—2018年天山北坡经济带NR总体上呈波动上升趋势，变化率为0.68 mm·a^{-1}(P<0.01)。年均NR为115.46 mm，最小值与最大值分别为2018年与1988年。1961—1986年总体呈上下波动趋势，变异系数(C_v)为22.5%。1987—2012年NR显著增加，年均NR相比1961—1986年增长了39.5%，变异系数(C_v)为20.2%，波动幅度相对变小。2013—2018年呈递减趋势，与1987—2012年相比平均减少了26.6%。

从空间上看(图2b)，NR大小与海拔密切相关，高NR区呈侧向Y形分布，集中于天山北坡经济带西部和南部。东部和北部较小，部分地区不足36.00 mm。1961—2018年大部分地区NR呈增加趋势，且多为显著性增加(P<0.05)(图2c)。西南部与西北部变化率最大，高达5.51 mm·a^{-1}。减少地区极少，集中于东南部，且减少不显著。1961—1986年整体变化不显著，减少区集中于南部(图2d)；1987—2012年西南部显著增加，变化率达7.70 mm·a^{-1}，东南部显著减少趋势(图2e)；2013—2018年呈减少趋势，减幅较大区域集中于西部和南部(图2f)。

2.2　天然径流量突变检验

双累积曲线可用于分析河流NR的趋势变化以及发生变化的年份与变化大小[29]。图3a是天山北坡经济带降水-径流双累积曲线，经检验，1961—1979年降水累积量与NR累积量线性变化的线性回归斜率为0.49(P<0.001)，1980—2012年斜率为0.55(P<0.001)，2013—2018年斜率为0.35(P<0.001)，三个时期线性关系的相关度均大于0.90。为进一步确定NR突变年份，结合Mann-Kendall非参数统计检验方法进行计算(图3b)。图中 UF 统计量曲线与 UB 统计量曲线的交点是1980年，并且该交点介于0.05显著性水平线内，表明在Mann-Kendall非参数统计检验中NR突变点为1980年。结合上述分析，本文将1980年和2013年视为天山北坡经济带近60 a中NR变化的两个突变点。

注：图c、d、e、f中显著性水平均为0.05；NR为天然径流量，下同。

图2 1961—2018年天山北坡经济带NR变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of natural runoff in the northern slope economic belt of Tianshan Mountains from 1961 to 2018

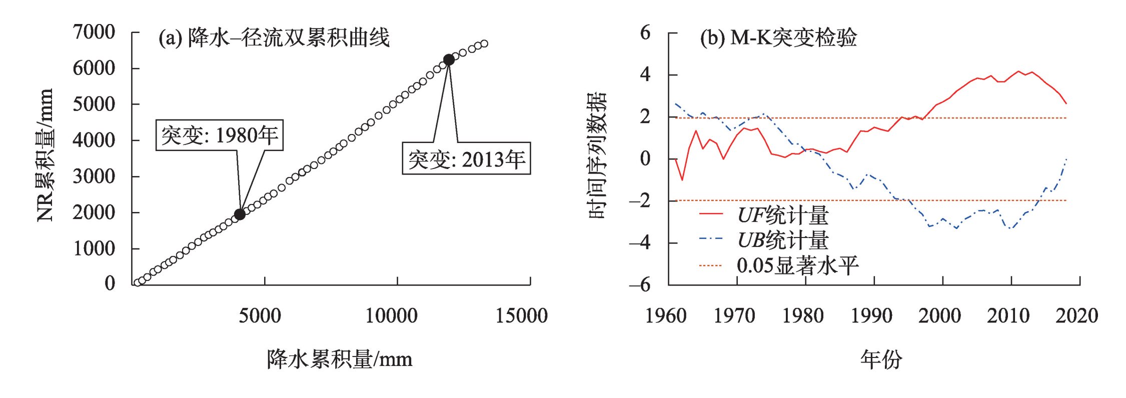


图3 天山北坡经济带NR突变检验

Fig. 3 Natural runoff mutation test of the northern slope economic belt of Tianshan Mountains

依据两个突变点分为3个时间段，第一阶段 P_1（1961—1979年）作为基准期，年均NR为96.68 mm。第二阶段 P_2（1980—2012年）为第一个变化期，年均NR为129.05 mm，比第一阶段增加33.5%。第三阶段 P_3（2013—2018年）为第二个变化期，年均NR为100.23 mm，比第二阶段减少了22.3%。

2.3 天然径流量变化归因识别

2.2.1 对降水、潜在蒸散发以及下垫面变化的敏感性分析 1961—2018年降水对NR变化的弹性系数平均值为1.33，潜在蒸散发对NR变化的弹性系数平均值为-0.33，下垫面对NR变化的弹性系数为-1.12。整体来看，1961—2018年天山北坡经济带降水促进NR增加，潜在蒸散发与下垫面变化导致NR减少，NR对降水变化最敏感（图4a）。

图4b显示，三个时期NR对降水、潜在蒸散发以及下垫面的敏感性均经历了先减小再增加，总体上看NR对降水、潜在蒸散发和下垫面的敏感性都呈现先减弱后增强。

2.2.2 天然径流量变化的归因识别 表1显示两个变化期降水、潜在蒸散发和下垫面对NR变化的影响大小。第一个变化期NR增加32.37 mm，其中降水贡献了22.20 mm增量，潜在蒸散发使NR减少0.10 mm，下垫面变化促进NR增加了10.27 mm。第二个变化期NR增加3.55 mm，其中降水导致NR增加42.21 mm，但潜在蒸散发与下垫面变化分别削减了1.84 mm与36.82 mm。1961—2018年，天山北坡经济带NR经历了先增加再减少的变化过程，降水对NR变化的贡献率超过50.0%，降水是NR变化的主导因素；潜在蒸散发与下垫面对NR的影响不断加深，尤其是下垫面对NR变化的贡献率从第一个变化期的31.5%上升至第二个变化期的45.5%，对天山北坡经济带NR变化的影响越来越强。

2.2.3 天然径流量变化归因的空间分异 图5显示不同因素对NR变化贡献率的空间分异特征。1980—2012年下垫面对NR变化的贡献率低值区出现在东南部，高贡献率区集中于西北部与东部。2013—2018年多个区域下垫面对NR变化的贡献率超过了50%，相对集中于西部、中南部以及东部，其中西南部与中南部下垫面贡献率变化明显，下垫面是NR变化的主导因素。降水对NR变化的贡献率高于潜在蒸散发，第一个变化期内研究区大部分地区NR变化主要受降水控制，潜在蒸散发的贡献率普遍较小。第二个变化期内降水对NR变化的贡献率的高峰值区由西部转向东部与中部，潜在蒸散发

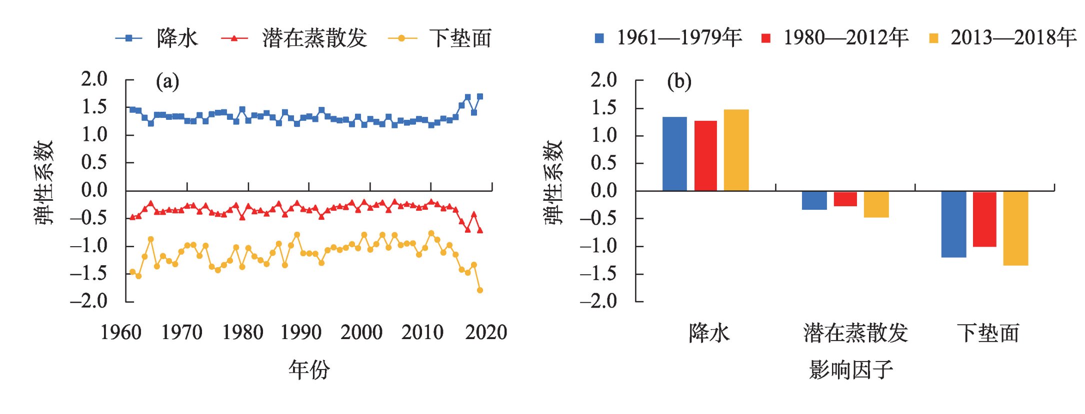


图4 NR对降水、潜在蒸散发和下垫面的弹性系数年际变化

Fig. 4 Interannual variation of natural runoff on elasticity coefficient of precipitation, potential evapotranspiration and underlying surface

表1 天山北坡经济带NR变化归因分析

Tab. 1 Contribution to natural runoff changes on the northern slope economic belt of Tianshan Mountains

参数	dR_P /mm	dR_{ET_0} /mm	dR_ω /mm	C_P /%	C_{ET_0} /%	C_ω /%
第一个变化期（1980—2012年）	22.20	−0.10	10.27	68.2	0.3	31.5
第二个变化期（2013—2018年）	42.21	−1.84	−36.82	52.2	2.3	45.5

注：dR_P 为降水引发的NR变化，dR_{ET_0} 为潜在蒸散发引发的NR变化，dR_ω 为下垫面变化引发的NR变化，C_P 为降水对NR变化的贡献率，C_{ET_0} 为潜在蒸散发对NR变化的贡献率，C_ω 为下垫面变化对NR变化的贡献率。

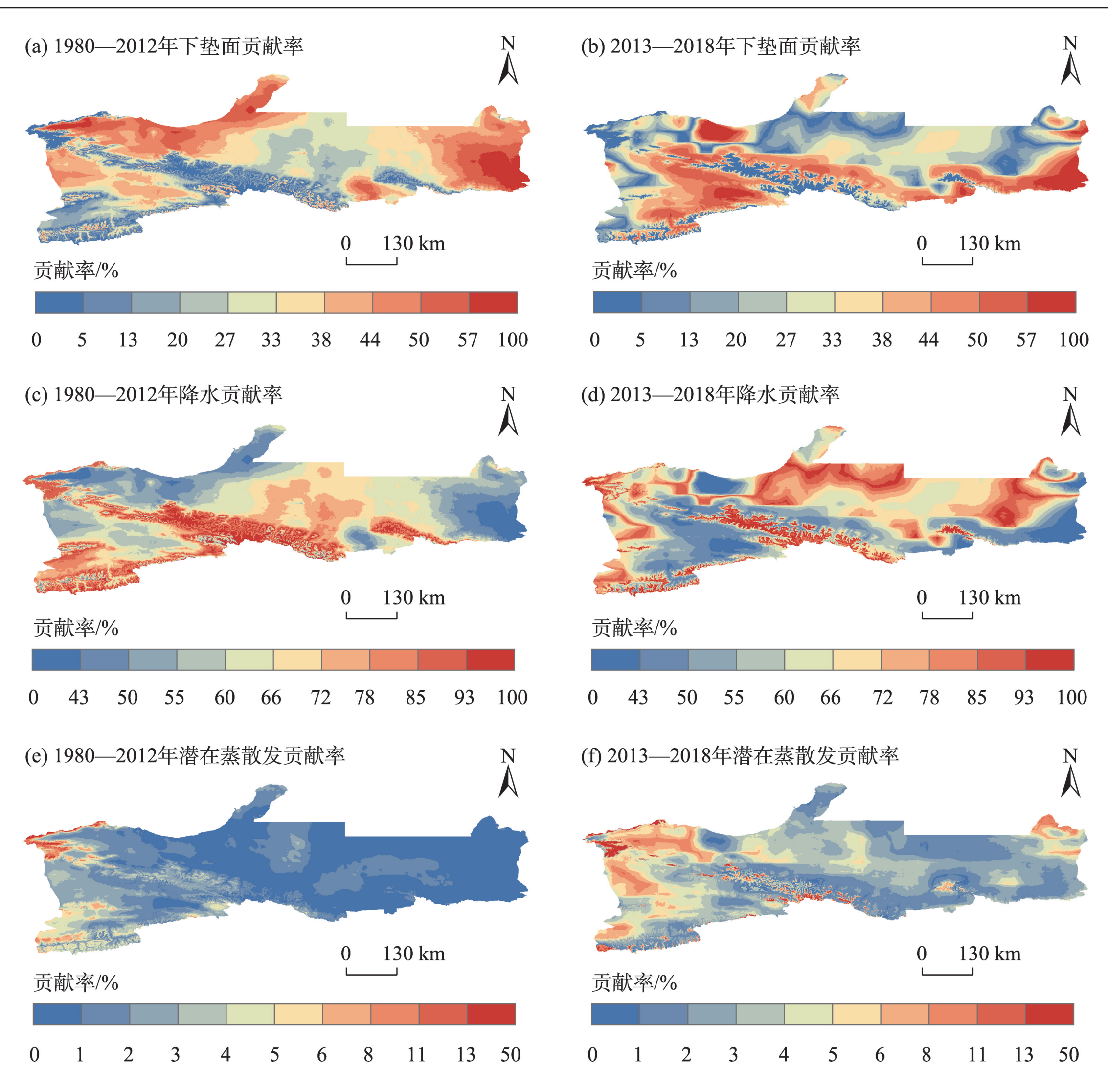


图5　NR变化贡献率的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of attribution of natural runoff change

对NR变化的贡献率高值区主要在西部。总体来说，天山北坡经济带NR变化受下垫面影响越来越大，2013年后研究区西部、东部和中南部下垫面已取代降水成为影响NR变化的第一因素。

3　讨论

1961—2018年，降水一直是天山北坡经济带NR变化的主导因素，潜在蒸散发与下垫面对NR的影响不断加强。对于天山北坡经济带而言，降水是NR的主要来源，因此对降水变化极为敏感[30]。新疆气候呈现暖湿化趋势[31]，1960—2018年天山北坡经济带降水与气温均呈现增长趋势（P<0.01）。图6c所示，1961—2012年降水与NR均呈显著的正相关关系（P<0.01），表明降水增多能够增加NR，是天山北坡经济带NR总体增加的重要影响因素，而2013—2018年降水与NR相关性并不显著，但仍为正相关，说明2013年后NR受到水以外的其他因素严重影响，但降水总体上仍对NR起到增加效果。整体来看，从基准期到变化期，NR随降水变化增加率不断减小，说明其他因素的加入影响了NR变化。潜在蒸散发是反映气温对NR影响的方式之一。依据图6d，气温与天山北坡NR的相关性均不显著，说明气温不是直接影响NR的主要因素，但气温可以通过多种方式间接影响NR。根据现有研究，天山北坡经济带荒漠等裸土地多，植被覆盖度小，实际蒸散极大，直接降水很难被保存下来，山区冰川积雪是其水资源的重要组成部分[32]，能调节区域NR变化。1980年以来，天山北坡经济带气温呈现明显的升高趋势，能促进高山冰川融化，通过冰

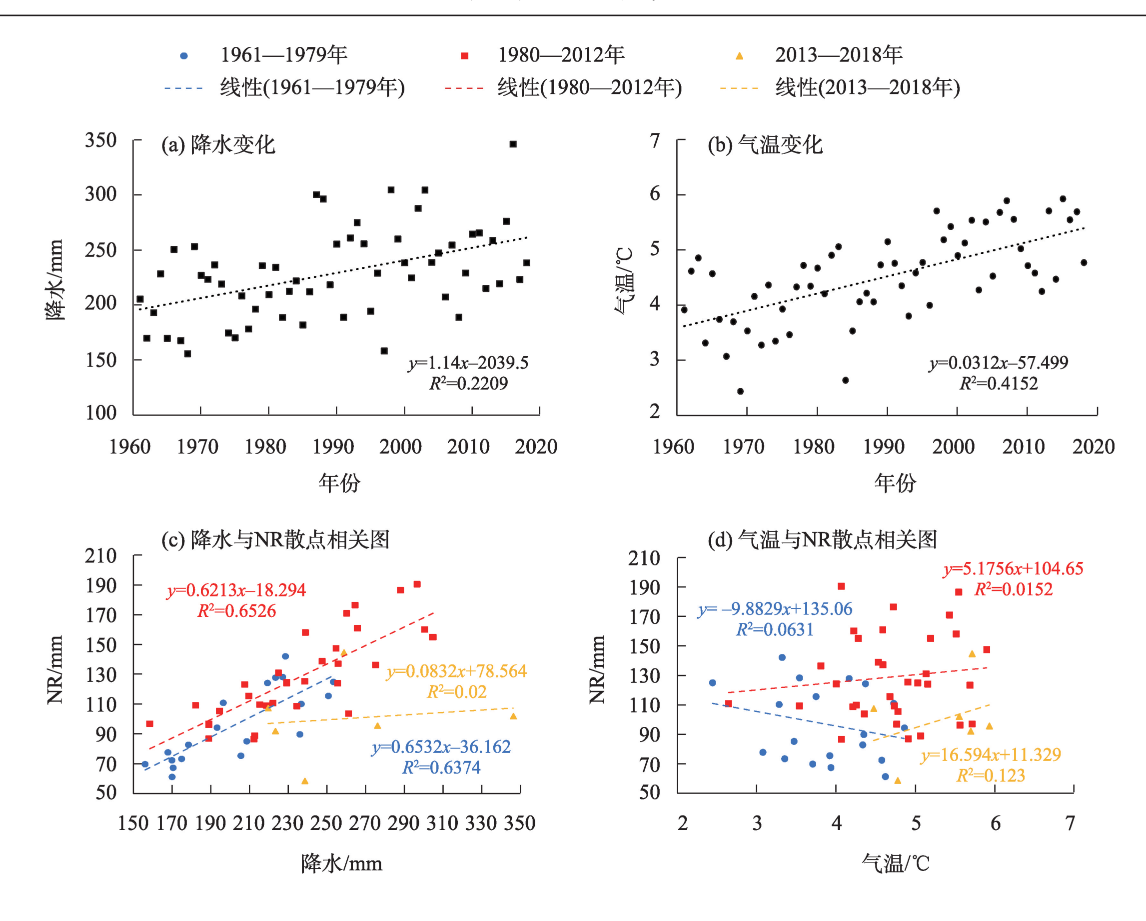


图6 天山北坡经济带降水、气温特征

Fig. 6 Characteristics of precipitation and air temperature in the northern slope economic belt of Tianshan Mountains

雪融水进一步补给径流。此外，气候变暖能驱动陆地水循环，改变水循环过程，影响内陆干旱区降水及空间分布[33]，从而通过降水影响NR。未来一段时期内新疆降水呈增加趋势[34]，加上气候变暖造成冰川萎缩，调丰补枯作用减弱[35]，受此影响天山北坡经济带径流总量与地区分布将可能发生变化，需要持续关注。

NR受区域气候及下垫面综合作用影响[36]。本研究结果显示，天山北坡经济带下垫面对NR变化的贡献率由31.5%上升至45.5%，下垫面变化对NR的影响不断增强。天山北坡经济带下垫面发生显著变化，并对NR影响进一步加强，后续研究有必要对下垫面的物理意义与数学表达进一步探究，厘清下垫面代表的各因子内容及对NR的影响机制。

4 结 论

本研究探讨了天山北坡经济带NR变化的时空分异特征，量化降水、潜在蒸散发和下垫面对NR变化的贡献。主要结论如下：

(1) 从时间上看，近60 a天山北坡经济带NR总体上呈波动增加趋势，变化率为0.68 mm·a^{-1}。其中1961—1986年呈上下波动且幅度较大，1987—2012年呈波动幅度缩小，NR增加趋势，2013—2018年年均NR下降。

(2) 从空间上看，NR高值区呈侧向“Y”形空间分布，与海拔大小密切相关，主要集中于西部和南部。近60 a大部分地区NR呈显著增加趋势，其中西南部与西北部增幅最大。

(3) 研究区NR存在两个明显的突变点，分别是1980年和2013年。第一个变化期(1980—2012年)降水对NR变化的贡献率为68.2%，第二个变化期(2013—2018年)降水的贡献率下降至52.2%，下垫面贡献率已达45.5%。尽管降水一直是研究区NR变化的主导因素，但下垫面的影响不断变大。

(4) 不同时段不同区域NR变化归因明显分化。第一个变化期(1980—2012年)降水是研究区大部分区域NR变化的主导因素，但第二个变化期(2013—2018年)研究区西部、东部与中南部地区下

垫面取代降水成为NR变化的主导因素。

参考文献(References):

[1] Dey P, Mishra A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 278−290.

[2] 梁双河, 牛最荣, 贾玲. 祖厉河干流近65 a径流变化及归因分析[J]. 干旱区研究, 2024, 41(6): 928−939. [Liang Shuanghe, Niu Zuirong, Jia Ling. Analysis of runoff changes and attribution in the main stream of Zuli River in the past 65 years[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(6): 928−939.]

[3] 段雨佳, 何毅, 赵杰, 等. 人类活动对秦岭月河流域径流变化的影响分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 605−614. [Duan Yujia, He Yi, Zhao Jie, et al. Analysis of impact of human activities on runoff changes in Yue River Basin of the Qinling Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 605−614.]

[4] 胡广录, 陶虎, 焦娇, 等. 黑河中游正义峡径流变化趋势及归因分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1414−1424. [Hu Guanglu, Tao Hu, Jiao Jiao, et al. Runoff trend and attribution analysis of the Zhengyi Gorge in the middle reaches of the Heihe River[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(9): 1414−1424.]

[5] 江善虎, 刘亚婷, 任立良, 等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 9−14, 70. [Jiang Shanhu, Liu Yating, Ren Liliang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 9−14, 70.]

[6] 陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 111−119. [Chen Yaning, Li Yupeng, Li Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 111−119.]

[7] 朱慧, 王哲, 焦光辉, 等. 天山北坡经济带经济格局时空演变特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 23−29. [Zhu Hui, Wang Zhe, Jiao Guanghui, et al. Spatial dynamic evolution of economic pattern in economic belt on the north slope of Tianshan[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(3): 23−29.]

[8] 凌敏华, 陈万贺. 地下水资源对新疆经济社会支撑作用的定量评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 49−54, 62. [Ling Minhua, Chen Wanhe. Quantitative evaluation of groundwater resources supporting economy and society in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 49−54, 62.]

[9] 陈伏龙, 王怡璇, 吴泽斌, 等. 气候变化和人类活动对干旱区内陆河径流量的影响——以新疆玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 692−697. [Chen Fulong, Wang Yixuan, Wu Zebin, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff of continental river in arid areas: Taking Kensiwate Hydrological Station in Xinjiang Manas River Basin as an example[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 692−697.]

[10] 魏天锋, 刘志辉, 姚俊强, 等. 呼图壁河径流过程对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 102−107. [Wei Tianfeng, Liu Zhihui, Yao Junqiang, et al. Response of Hutubi River runoff process on climate change[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(4): 102−107.]

[11] 王荣军, 刘时银, 王睿, 等. 天山北坡降雨补给型河流径流变化特征及其影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1353−1361. [Wang Rongjun, Liu Shiyin, Wang Rui, et al. Analysis of a river fed by precipitation in north slopes of the Tianshan Mountains: Runoff characteristics and influence factors[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1353−1361.]

[12] 陈红光, 孟凡浩, 萨楚拉, 等. 北方牧区草原内陆河流域径流演变特征及其驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 39−50. [Chen Hongguang, Meng Fanhao, Sa Chula, et al. Analysis of the characteristics of runoff evolution and its driving factors in a typical inland river basin in arid regions[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(1): 39−50.]

[13] Chen Z S, Chen Y N, Li B F. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of northwest China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 111(3−4): 537−545.

[14] 刘思海, 侍克斌, 张宏科, 等. 近60年渭干河上游克孜尔水库水沙变化趋势及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(8): 153−160. [Liu Sihai, Shi Kebin, Zhang Hongke, et al. The variation trend of streamflow and sediment flux in the upper reaches of Weigan river over the past 60 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(8): 153−160.]

[15] 王金凤. 气候变化和人类活动影响下的北大河流域径流变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3): 86−91. [Wang Jinfeng. Analysis on runoff variation in the Beida River Basin under the influence of climate change and human activities[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3): 86−91.]

[16] 张艳霞, 于瑞宏, 薛浩, 等. 锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 67−76. [Zhang Yanxia, Yu Ruihong, Xue Hao, et al. Response of runoff volume change to climate change and human activities in the Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 67−76.]

[17] 张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于Budyko假设的渭河径流变化归因识别[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7607−7617. [Zhang Limei, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Attribution of runoff variation in the Wei River Basin based on the Budyko hypothesis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7607−7617.]

[18] 穆兴民, 李靖, 王飞, 等. 黄河天然径流量年际变化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 1−5. [Mu Xingmin, Li Jing, Wang Fei, et al. Analysis on the annual natural runoff variety process of the Yellow River[J]. Journal of Arid Land Resources and

Environment, 2003, 17(2): 1-5.]

[19] 王楠, 李明蔚, 陈首志, 等. 基于堆叠机器学习的非充分数据条件下流域径流还原方法研究: 以沮漳河为例[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 2024: 1-14. [2024-07-01]. https: //link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20240701.1207.005. [Wang Nan, Li Mingwei, Chen Shouzhi, et al. A watershed runoff reconstruction method based on stacked ensemble machine learning under incomplete data: A case study of Juzhanghe River[J/OL]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024: 1-14. [2024-07-01]. https: //link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20240701.1207.005.]

[20] 李焯, 任凤仪, 李晓, 等. 黄河流域天然径流量还原及一致性处理方法研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(12): 37-40, 134. [Li Zhuo, Ren Fengyi, Li Xiao, et al. Study on natural runoff reduction and consistency treatment methods in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023, 45(12): 37-40, 134.]

[21] 郝鑫怡, 张喆, 郑浩, 等. 天山北坡经济带植被覆盖度时空变化特征及影响因素探测[J/OL]. 中国环境科学, 2023: 1-12. [2023-10-12]. https: //doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230926.002. [Hao Xinyi, Zhang Zhe, Zheng Hao, et al. Detection of spatial and temporal variation characteristics of vegetation cover in the economic zone of the northern slopes of Tianshan Mountains and the influencing factors[J/OL]. China Environmental Science, 2023: 1-12. [2023-10-12]. https: //doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230926.002.]

[22] 方创琳, 高倩, 张小雷, 等. 城市群扩展的时空演化特征及对生态环境的影响——以天山北坡城市群为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1413-1424. [Fang Chuanglin, Gao Qian, Zhang Xiaolei, et al. Spatiotemporal characteristics of the expansion of an urban agglomeration and its effect on the eco-environment: Case study on the northern slope of the Tianshan Mountains[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(9): 1413-1424.]

[23] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. Ecological Indicators, 2015, 51: 117-126.

[24] Fu J Y, Liu B J, Wang W G, et al. Evaluating main drivers of runoff changes across China from 1956 to 2000 by using different Budyko-based elasticity methods[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: 117070.

[25] Yang H B, Yang D W, Lei Z D. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): W03410.

[26] Choudhury B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1-2): 99-110.

[27] Xu X Y, Yang D W, Yang H B, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530-540.

[28] Yang H B, Yang D W. Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff[J]. Water Resources Research, 2011, 47: W07526.

[29] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4): 47-51. [Mu Xingmin, Zhang Xiuqin, Gao Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4): 47-51.]

[30] 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 近50年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 165-171. [Guo Aijun, Chang Jianxia, Wang Yimin, et al. Variation characteristics of rainfall-runoff relationship and driving factors analysis in Jinghe River Basin in nearly 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 165-171.]

[31] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 新疆气候变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 499-508. [He Jinyun, Zhang Mingjun, Wang Peng, et al. New progress of the study on climate change in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 499-508.]

[32] 刘爽爽, 李忠勤, 张慧, 等. 天山典型冰川区径流年内变化分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1388-1395. [Liu Shuangshuang, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Temporal inner-annual runoff variation in the variation in the typical glacier region of the eastern Tianshan Mountains, China[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1388-1395.]

[33] Thompson J R. Modelling the impacts of climate change on upland catchments in southwest Scotland using MIKE SHE and the UKCP09 probabilistic projections[J]. Hydrology Research, 2012, 43(4): 507-530.

[34] 左其亭, 李佳伟, 马军霞, 等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 21-27. [Zuo Qiting, Li Jiawei, Ma Junxia, et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 21-27.]

[35] 魏潇娜, 龙爱华, 尹振良, 等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 137-144. [Wei Xiaona, Long Aihua, Yin Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 137-144.]

[36] 田鹏, 穆兴民, 赵广举, 等. 近549年来黄河天然径流量时间变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 65-69. [Tian Peng, Mu Xingmin, Zhao Guangju, et al. Variations of natural runoff in the Yellow River since 1470[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 65-69.]

Spatio-temporal variation and attribution identification of natural runoff in the northern slope economic belt of Tianshan Mountains during the past 60 years

LI Yuhang[1], YU Wenxue[1], YANG Yongjun[2], ZHU Yanfeng[2], MA Jing[1], CHEN Fu[1]

(1. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211000, Jiangsu, China; 2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: The northern slope economic belt of the Tianshan Mountains is located in the hinterland of Asia which faces severe drought. For regional development and ecological security, it is crucial to clarify the temporal and spatial changes of natural runoff and their causes. Therefore, Sen's slope estimation method, the Mann-Kendall trend test, and others were used to analyze the temporal and spatial changes of natural runoff. The Budyko model parameter was applied to quantitatively evaluate the contribution of precipitation, potential evapotranspiration, and underlying surface to natural runoff changes. The results suggested that: (1) The natural runoff of the economic belt on the north slope of the Tianshan Mountains increased during the recent 60 years, and the annual change rate was 0.68 $mm \cdot a^{-1}$. The fluctuation was conspicuous from 1961 to 1986 and decreased from 1987 to 2012. The natural runoff elevated from 1987 to 2012 and declined significantly after 2013. (2) The natural runoff volume and the elevation change were highly superposed in space, the natural runoff in the west and south was larger, and the increase in the southwest and northwest was highest. (3) Abrupt change points in natural runoff occurred from 1980 to 2013, with precipitation being the main factor. However, the influence of the underlying surface elevated, and the contribution rate enhanced from 31.5% to 45.5% in the past 60 years. (4) Before 2012, the natural runoff was mainly dominated by precipitation, but the influence was region-specific. In 2013, the influence of underlying surface on natural runoff in the west, east, central, and southern regions exceeded precipitation to become the dominant factor. It deepens the understanding of natural runoff change in the northern slope economic belt of the Tianshan Mountains and provides scientific support for the high-quality development of the region.

Keywords: natural runoff variation; spatial-temporal pattern; precipitation; underlying surface; the northern slope economic belt of Tianshan Mountains